

## DESTILADOR SOLAR MULTIETAPA SUBATMOSFERICO

**Franco, J.<sup>1</sup>, Saravia, L.<sup>2</sup>, Fernández C., Esteban, S.**

INENCO (UNSa – CONICET), Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina

Tel.: 54 87 4255424 - Fax: 54 87 4255489

Email: francojudita@yahoo.com.ar

*Recibido 15/08/13, Aceptado 30/09/13*

**RESUMEN:** Se presenta el diseño y los primeros resultados experimentales de un destilador multietapa operado a baja presión. El destilador está formado por varias etapas que se superponen verticalmente. El agua salada se entrega en la etapa superior y va pasando sucesivamente de etapa en etapa. La fuente térmica calienta la etapa inferior y por evaporaciones sucesivas calienta las superiores. El área de base es de 0.5 x 0.8 m<sup>2</sup>. El perímetro de cada etapa se construyó con caños cuadrados reforzados para poder bajar la presión interna evaluando un posible aumento de la producción. Se muestran detalles constructivos del equipo y resultados experimentales preliminares

**Palabras claves:** destilador múltiple, construcción destilador, energía solar, resultados experimentales, datos simulados

## INTRODUCCIÓN

Globalmente la Argentina dispone de una oferta hídrica media anual por habitante sumamente importante superior a los 22.500 m<sup>3</sup>/hab, No obstante la distribución de la oferta es muy irregular, por lo que en varias provincias de la región árida la disponibilidad de agua se ubica bien por debajo del umbral de stress hídrico propuesto por el PNUD. El Sistema de la Cuenca del Plata, por ejemplo, concentra más del 85 % del derrame total medido.

La variedad de climas que resultan de la gran extensión y ubicación del territorio, la diversidad de relieves y las consecuentes variaciones de humedad y temperatura determinan regímenes hídricos muy variados. Dos tercios de la superficie del País se encuentra bajo condiciones climáticas áridas o semiáridas.

A la variación estacional muy pronunciada, se suma una alta variabilidad interanual, en muchos casos incrementada por los fenómenos climáticos globales como el de la Corriente del Niño, que provocan problemas de sequías e inundaciones según las regiones.

En Argentina se hace un uso importante de las aguas subterráneas ya que un 30% del agua promedio extraída en el ámbito nacional para los distintos usos, es de origen subterráneo. En el caso del riego en las regiones áridas y semiáridas, las reservas de agua subterránea cumplen un rol esencial al asegurar una regulación plurianual de los recursos.

En los últimos años, sin embargo, se advierte la tendencia a una mayor utilización, derivado por una parte de los problemas de disponibilidad y calidad que se están registrando en las fuentes superficiales, y por otra, de una mayor actividad en los procesos industriales en áreas con insuficientes fuentes superficiales, como los de la actividad petrolífera y minera. (Calcagno et al, 2000)

### *Disponibilidad de agua en el noroeste argentino*

La región del noroeste argentino comprende las regiones de puna, cordillera oriental, sierras subandinas y pedemonte y llanura chaco salteña. La caracterización del agua en esta región la podemos describir por zonas según Auge et al. (2006)

### *Puna*

El agua, en general, es potable y apta para riego, aunque existen notables anomalías regionales en el contenido de arsénico y de boro, ambos de origen natural, con contenidos que pueden superar ampliamente los límites tolerables para dichos usos. Hay contaminación puntual por la minería, en especial por plomo y también bacteriológica por líquidos cloacales. Las lagunas poseen

alto contenido de cloruro de sodio, o bien se trata de salares con espesas cubiertas de sal gema. La fuerte demanda de agua en los centros urbanos agudizará la problemática actual. También el sector minero emplea agua subterránea.

### *Cordillera Oriental-Sierras Subandinas y sus valles*

La población se encuentra concentrada en los valles intermontanos, relacionada con la agricultura intensiva (caña de azúcar, tabaco, cítricos y hortalizas). Las precipitaciones registran una marcada disminución en invierno, lo que junto con el incremento de la evapotranspiración, deriva en un notorio déficit en el balance hídrico. Por ello, los reservorios de agua subterránea poseen una importancia estratégica. Aunque en general el agua es apta para todos los usos, en la ciudad de Salta se han registrado casos de contaminación por nitratos de efluentes urbanos y por boro de la industria minera.

---

<sup>1</sup> Investigador Adjunto CONICET

<sup>2</sup> Investigador Principal del CONICET

### *Piedemonte y Llanura Chaco-salteña*

Existe gran heterogeneidad en la calidad físico-química y en la productividad. Las principales limitantes son los sulfatos y el arsénico, éste último especialmente en el abanico del Río Juramento. Existe riesgo de salinización debido a deficiencias en las perforaciones.

Observamos entonces que de las tres regiones dos de ellas poseen agua con altos contenidos de sales que no la hacen apta para el consumo humano, pensar en cualquier desarrollo en la región involucra la necesidad de contar con suficiente agua dulce para consumo.

## **DESALINIZACION**

Para obtener agua dulce de aguas salinizadas existen diversos procesos, todos ellos involucran el uso de fuentes de energía para la separación de la sal. En las regiones anteriormente mencionadas el recurso energético renovable más abundante es la radiación solar, ya que se observa un alto nivel de radiación.

De los distintos tipos de tecnologías de desalación de agua que utilizan energía solar, se encuentra que una de las más prometedoras para producciones medianas o altas, en función a los costos y a la tecnología disponible, es la que acopla una central solar térmica con un proceso de desalinización de agua.

Esto significa que es económicamente y tecnológicamente factible generar electricidad mediante la producción de vapor a alta presión y el vapor residual utilizarlo, como fuente de calor, en el proceso de desalinización de agua. Numerosos estudios tienen como conclusión lo anteriormente expuesto (Alarcon et al) (Miller, 2003), en los mismos se realiza un análisis global de todo el proceso teniendo en cuenta la eficiencia y los costos.

Actualmente investigadores del INENCO están construyendo un Concentrador Fresnel Lineal de 270 m<sup>2</sup> dentro de un proyecto destinado a desarrollar por completo un módulo que pueda ser directamente transferido para la generación de energía eléctrica o producción de vapor. La longitud de las filas de espejos será de 30 metros. Es posible entonces utilizar este sistema para acoplarlo a un desalinizador.

Nuestro grupo desde el año 1992 que investiga sobre desalinización de agua con energía solar, inicialmente se trabajó con destiladores sencillos de tipo invernadero destinados a usos rurales con pequeñas producciones. Para producciones mayores se logró desarrollar un sistema de múltiple efecto que funciona sin energía eléctrica mejorando la producción de los destiladores clásicos en un factor de 2.7.

Para utilizar el vapor residual (100 C y 1 atm) se decidió ensayar un prototipo basado en el diseño del destilador multietapa Franco-Saravia, y analizar su funcionamiento en condiciones de presión atmosférica y de baja presión, ya que según diversos autores Reddy, Ahmed, Alarcon, se obtiene una mayor producción con presiones subatmosféricas.

Ejemplos de destiladores multietapas que trabajan con baja presión se puede encontrar en la bibliografía. La figura 2 muestra dos esquemas diferentes de equipos. El de Reddy (de la izquierda), la salmuera es calentada en colectores solares se introduce en paralelo en cada una de las etapas, en las cuales se realiza el vacío a través de una bomba de vacío, para distribuir mejor la salmuera en cada una de las bandejas se colocan telas, el agua evapora y condensa en la superficie inferior de la etapa siguiente aportando un calor adicional. El condensado escurre por la parte inferior y es colectado por unas canaletas que lo llevan al exterior. En el destilador de Ahmed (derecha) la diferencia consiste en que la salmuera entra al equipo a la temperatura ambiente en cada una de las etapas. Se utiliza un intercambiador de calor en la bandeja inferior para calentar el líquido y provocar la evaporación. El fluido caloportador en el intercambiador proviene de un colector solar,

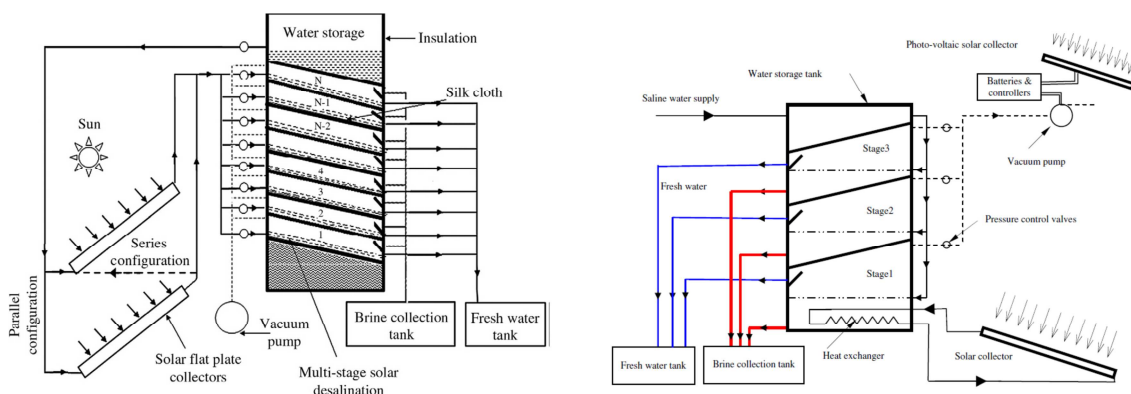


Figura 1: Esquema de dos modelos de destiladores multietapa que trabajan a baja presión Reddy (2009) y Ahmed (2012)

En estos modelos se observa un aumento hasta de un 90% de la producción de agua cuando se disminuye la presión desde la atmosférica a 0,2 atm para ambos destiladores.

## DESCRIPCIÓN DEL DESTILADOR

En base a lo analizado y utilizando el destilador propuesto por Franco et al, se proyectó un destilador como el de la figura 2, esta muestra un esquema de un corte transversal del prototipo construido. El mismo consiste en 5 bandejas inclinadas distribuidas en zigzag, por las que circula el agua salinizada a destilar. Cada una de estas bandejas forma una etapa. La bandeja inferior es una batea poco profunda. La alimentación se realiza en la etapa superior y baja por gravedad escurriendo por cada una de las bandejas. La salmuera entra fría por una única entrada y aumenta su temperatura mientras baja por las bandejas.

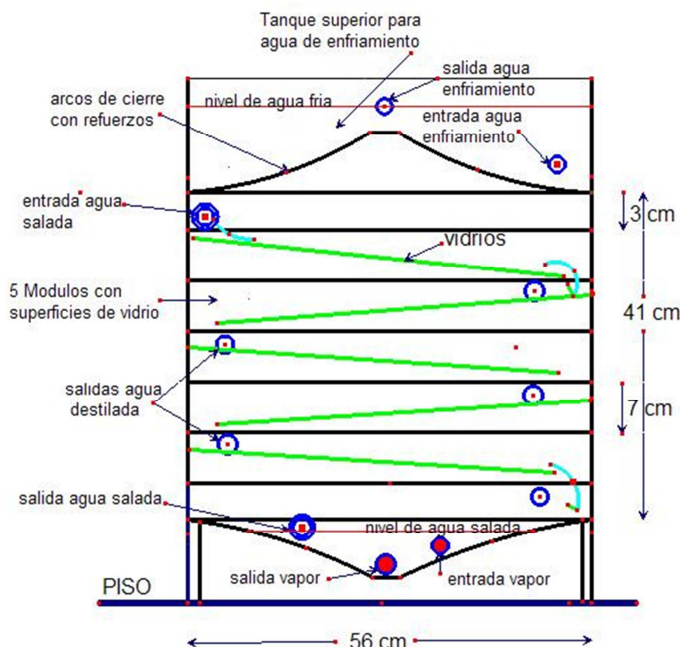


Fig 1: esquema del destilador construido

El agua de la bandeja inferior se calienta mediante un intercambiador de calor, por el que circula vapor de agua proveniente del generador solar de vapor. El agua caliente evapora y condensa en la superficie inferior de la primera etapa, el calor es transferido por conducción al film de agua, provocando evaporación. Este proceso se repite en cada una de las etapas siguientes. Al estar la superficie inclinada, el condensado escurre por la parte inferior de las placas y se recoge en las canaletas, sale al exterior mediante un tubo. El equipo se cierra con una tapa-tanque enfriador por la que circula agua de enfriamiento.

El prototipo construido es capaz de soportar baja presión ya que se espera un aumento de la producción. La estructura exterior de cada etapa está realizada con caño estructural rectangular, cada etapa se construye independientemente de la otra, de manera tal de poder probar con distinto número de etapas.

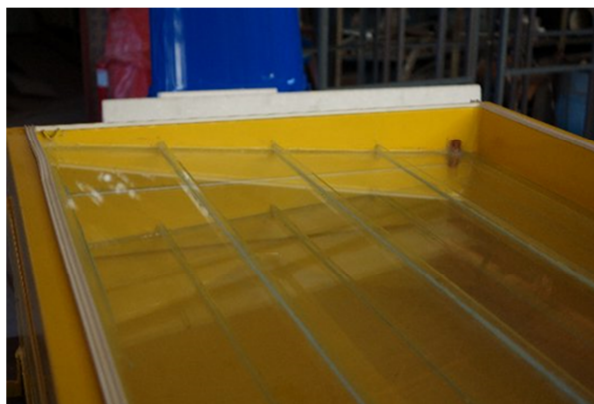


Fig 3: foto de una de las etapas del destilador

Las bandejas (etapas) son de vidrio de 3 mm de espesor y cuentan con unos perfiles de 1 cm de altura que se colocan para contener el agua como la pared de un dique. La pendiente de las placas de vidrio es de 5°. Cada una de las etapas tiene una

altura de de 7 cm. La foto 3 muestra una de las etapas. En el nivel mas bajo de la placa de vidrio se tiene un agujero por donde pasa el agua y cae a la bandeja siguiente de abajo.

Este equipo presenta algunas ventajas respecto a otros equipos publicados:

- 1) La disposición de alimentación de una etapa por el agua salada que sale de la etapa anterior simplifica la construcción y alimentación. Además, se logra una reducción del consumo energético ya que cada etapa recibe agua con un cierto aumento de temperatura en vez de recibirla fría.
- 2) Se usa un ángulo pequeño de deslizamiento en el vidrio de cada etapa. Igualmente se logra un buen deslizamiento utilizando previamente un proceso especial de limpieza de cada superficie. Esto reduce significativamente la altura del equipo ahorrando material.
- 3) No se colocan telas para distribuir uniformemente el agua que desliza. Se usan diques de vidrio normales al sentido de flujo que forman pequeños lagos cubriendo toda el área horizontal. Al no usar telas se mejoran los problemas de mantenimiento. Por otro lado, la masa de agua dentro del equipo sube muy poco ya que los lagos tienen una altura muy baja.

La base del destilador consiste en una bandeja que contiene el agua salinizada y dentro de esta se encuentra el intercambiador de calor por donde circula el vapor de agua. Tiene un caño de rebalse para mantener el nivel del agua. La fig 4 muestra una foto de la bandeja inferior, la forma redondeada es para poder soportar la diferencia de presión provocada por el vacío interior.

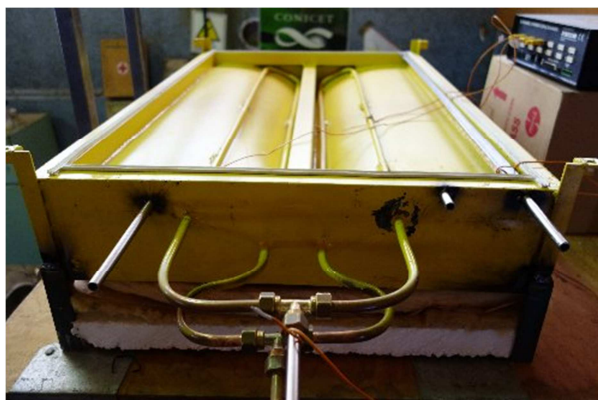


Fig 4: bandeja inferior

La tapa superior contiene un tanque de agua que sirve de fuente fría para impulsar el proceso de evapo- condensación, en el también se colocan la cañería de alimentación y la entrada de la bomba de vacío. La tapa superior se muestra en la fig 5.



Fig 5 tapa superior

Una vez construido el equipo se cierra colocando una bandeja sobre la otra, las mismas tienen un burlete de goma que permite un cierre más hermético, luego se ajusta todo con unas varillas roscadas.

Todo el equipo se aísla con lana de vidrio de 7 cm de espesor y con placas de poliestireno expandido de 3 cm de espesor. Si se baja la presión dentro del destilador, deben usarse procedimientos especiales para poder extraer el agua dada la diferencia de presión. Una posibilidad que no necesita de una bomba mecánica es elevar el equipo unos metros por encima del piso y conectar una cañería plástica rígida que baje y se introduzca en un recipiente con agua ya destilada. Al hacer vacío el agua del recipiente se elevará hasta compensar la diferencia de presión por lo que el caño estará a una presión igual a la interior del equipo y el agua destilada bajará por la cañería. Por vasos comunicantes una cantidad de agua equivalente a la que bajó saldrá

de la cañería y se depositará en el recipiente. La figura 6 muestra un soporte de 2 m de alto donde se colocará en primer instancia el equipo, instalando los depósitos para el agua destilada en el piso y permitiendo extraer agua sin bomba para depresiones de hasta 2 metros de columna de agua.



Fig 6: Destilador instalado en el laboratorio para realizar los ensayos

### PRIMEROS ENSAYOS

Los primeros ensayos del equipo se realizaron a presión atmosférica sin conectar la bomba de vacío. Para comprobar el funcionamiento y analizar las pérdidas. Se colocaron sólo dos etapas, la base y la tapa superior.

Se conectó el intercambiador a un recipiente generador de vapor (olla a presión) calentado con un mechero Bunsen.

Se midieron: la cantidad de destilado  $m_d$ , la cantidad de agua de salida del intercambiador,  $m_i$ , la cantidad de agua de rebalse, las temperaturas en la bandeja inferior,  $T_p$  y la del agua de rebalse  $T_{ps}$ , en la cara superior de la primera etapa  $T_{vp}$ , en la cara inferior de la segunda etapa  $T_{vd}$ , en el tanque de enfriamiento  $T_{enf}$  y en la zona intermedia entre las etapas  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{a3}$ . Se midió también la temperatura dentro de las dos canaletas de recolección de destilado  $T_{des1}$ ,  $T_{des2}$

La fig 8 muestra la disposición de las termocupas dentro del equipo.

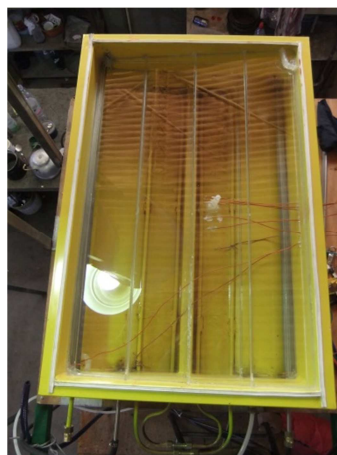
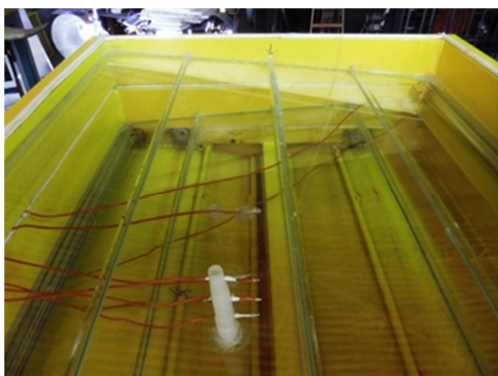


Fig 8 disposición de los puntos de medida de temperaturas



La grafica 9 muestra las curvas correspondientes a los valores medidos de temperatura durante una experiencia un día frio del mes de julio. En el periodo de funcionamiento del destilador (5 horas) se consumieron 7 litros de agua en el generador de vapor. Esto significó una potencia entregada de aproximadamente 800 W en las primeras 2 horas y luego se disminuyó a 600 W, cuando alcanzo la temperatura de funcionamiento que es alrededor de los 80 C. La caída de la temperatura a las 2, 5 hs es debido a fallas en la regulación del caudal de vapor que se introduce al intercambiador, una vez que este se estabiliza se pudo mantener la temperatura. La cantidad de agua destilada producida en el periodo de medida fue 1,540 lt, que consideramos que es muy baja ya que n se corresponde con lo que se predice en la simulación.

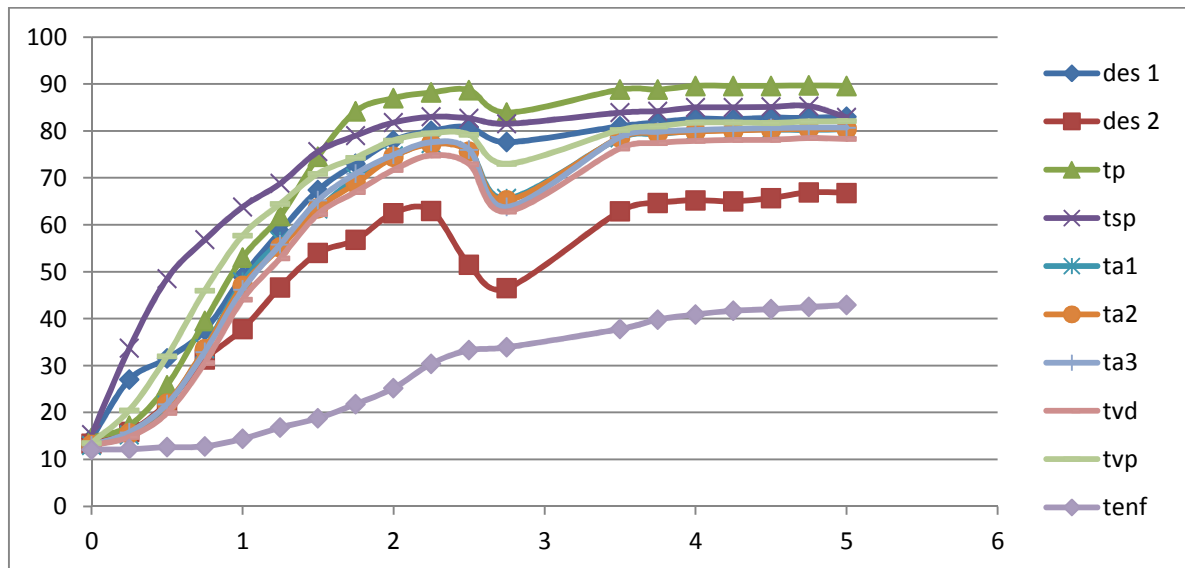


Fig 9: temperatura vs tiempo para los distintos puntos de medida dentro del destilador. des 1 y 2: temperaturas dentro de la canaleta en la etapa 1 y 2, tp, tsp, en la batea inferior y en la zona del rebalse, ta 1,2,3 temperaturas del aire en tres puntos, tvd y tvp temperatura de vidrio en la parte inferior de la etapa 2 y en la parte superior de la etapa 1, tenf temperatura de pileta de enfriamiento.

Se compararon los valores de temperatura medidos con los que predice el modelo desarrollado en la simulación (Saravia et al 2013), la gráfica 10 muestra estos valores.

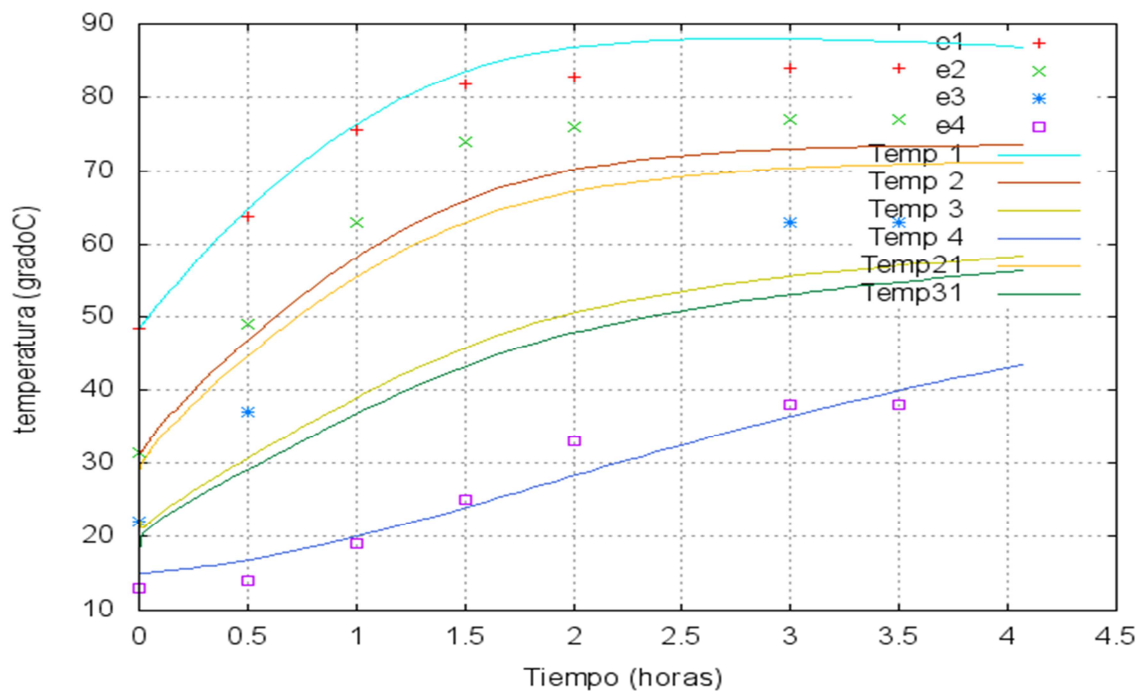


Fig. 10: valores de temperaturas obtenidas con la simulación, comparado con los valores medidos.

Las líneas llenas corresponden a las temperaturas simuladas y los puntos a los valores medidos de temperatura en cada una de las etapas, los subíndices indican las etapas en orden ascendente desde la base (e1), primera etapa (e2), segunda etapa (e3) hasta la de enfriamiento (e4). Las temperaturas de la batea inferior y la del tanque de enfriamiento se ajustan bastante a lo predicho, las de las dos bandejas están subestimadas. Es importante aclarar que en el modelo computacional se trabajó con las ecuaciones de balance de energía y de transferencia de calor que recomienda la bibliografía, sin ajustar los parámetros a los valores medidos, como se suele hacer en otras simulaciones. Esto nos indica que el modelo es suficientemente correcto, en un próximo trabajo se procurará que mejore la relación de temperaturas en cada una de las bandejas. Esto se podrá mejorar analizando cuidadosamente como influye cada uno de los procesos de transferencia de calor entre las etapas.

La simulación predice una producción de agua destilada de aproximadamente 5 litros en el periodo analizado. La producción medida fue mucho menor, por lo que supusimos que habría algún problema en la recolección del agua destilada. Se procedió a desarmar el equipo para observar directamente qué sucedía con la recolección de agua. Esto se realizó retirando la tapa superior que contiene el tanque de enfriamiento. Se observaron dos eventos que provocaban la pérdida de condensado. El primero fue que el vidrio de la segunda etapa estaba rajado en el medio, lo cual hacía que gotee antes de llegar a las canaletas. La otra razón que se observó, está relacionada con los detalles constructivos, y es que la gota crece hasta adquirir un volumen considerable cerca de la canaleta. Como los bordes de la canaleta estaban muy cerca del vidrio la gota chocaba con el borde y caía fuera de la canaleta, la solución a este problema se logra abriendo más la boca de la canaleta.

### Conclusiones:

El equipo construido permite la desalinización del agua produciendo agua destilada, en esta primer etapa se probó su funcionamiento y se ajustaron los detalles constructivos para asegurar una buena producción. Se compararon los valores medidos con el modelo computacional y se encontró que el modelo predice las temperaturas con bastante aproximación.

A partir de ahora se continuara experimentando incorporando la bomba de vacío, para disminuir la presión en el interior del destilador y observar cuanto aumenta la producción. La bibliografía consultada considera un aumento en la cantidad de agua destilada de hasta un 90 %.

El modelo computacional actualmente desarrollado no incorpora con mucho detalle el cambio de presión ya que los coeficientes de transferencia de calor involucrados corresponden a una mezcla de aire y vapor de agua a presión atmosférica y no se registra una gran diferencia con las variaciones cuando disminuye la presión. La experiencia nos ayudará a verificar estos coeficientes y adecuarlos a los cambios en la presión del interior del prototipo.

*Este trabajo está financiado por el proyecto PIP – CONICET 0708 - Desarrollo de Tecnología Solar de Desalinización de Agua con Alta Producción para la Mejora de Condiciones de Vida y Sistemas Productivos.*

### Referencias:

- Baudino, Guillermo, Hidrogeología del Valle de Lerma, Tesis Doctoral, <http://www.unsa.edu.ar/natura/GBaudino/>, 1996
- Calcagno, A.; Mendiburo, N.; Gaviño Novillo, M.; Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Argentina (2000)
- Auge, M. et al. 2006. Hidrogeología de Argentina. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 7-23, ISSN: 0366-0176
- Alarcón, D., Blanco, J., Lozano, A., Malato, S., Maldonado, M., Fernández, P., "EXPERIMENTAL RESULTS OF AQUASOL PROJECT: DEVELOPMENT OF AN ADVANCED HYBRID SOLAR-GAS MULTI-EFFECT DISTILLATION SYSTEM, Environmental Applications of Solar Energy and Characterization of Solar Radiation.
- James E. Miller, "Review of Water Resources and Desalination Technologies" Materials Chemistry Department, Sandia National Laboratories, Printed March 2003
- M. Gea, L. Saravia, C. Placco, M. Altamirano, M. Hongn, C. Fernández, R. Caso, F. Tilca, H. Bárcena, H. Suligoy "DISEÑO Y ESTADO DE AVANCE DE LA CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR FRESNEL LINEAL DE 270 m<sup>2</sup>", ASADES, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 16, 03.79-86, 2012. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- K.S. Reddy, K. Ravi Kumar, Tadhg S. O'Donovan, T.K. Mallick, "Performance analysis of an evacuated multi-stage solar water desalination system" Desalination 288 (2012) 80–92, Elsevier
- M.I. Ahmed, M. Hrairi\*, A.F. Ismail, "On the characteristics of multistage evacuated solar distillation", Renewable Energy 34 (2009) 1471–1478, Elsevier.
- J. Franco y L. Saravia "A New design for a multistage still". Renewable Energy, Vol. 4, No. 1, pp. 119-122, 1994, Pergamon Press. Great Britain.

J. Franco, L. Saravia, R. Caso y C. Fernandez.” Desarrollo de un destilador multiefecto atmosférico de superficies inclinadas”. Revista de la Asociación Argentina de Energía Solar "Energías Renovables y Medio Ambiente" Vol. 2, pp. 17,1997.

J. Franco, S. Esteban and L. Saravia. “Destilador multiefecto compacto”. Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 5, 1998, Pág. 53.

Saravia, L. , Franco , J., Esteban, S., Alia, Dolores Saravia Alia, D., La Simulación Numérica De Un Destilador Solar Múltiple, en prensa

#### **ABSTRACT**

This paper presents the design and first experimental results of a multistage distiller to be operated at low pressure. The distiller consists of several stages which overlap vertically. The salt water is delivered at the upper stage and passes successively from stage to stage. The thermal source heats the lower stage, and the others are heated by successive evaporations-condensation. Base area is 0.5 x 0.8 m<sup>2</sup>. The perimeter of each stage was constructed with reinforced square pipes to allow internal pressure lowering so the production can increase. It is shown the constructive details and preliminary experimental results